

MÉTODOS SIMPLIFICADOS NA AVALIAÇÃO SÍSMICA DE EDIFÍCIOS HISTÓRICOS



João C. A. ROQUE
Assistente do 2º triénio
Inst. Politec. de Bragança
Bragança



Paulo B. LOURENÇO
Professor Associado
Universidade do Minho
Guimarães

SUMÁRIO

Esta comunicação pretende dar uma contribuição para a avaliação do estado das construções históricas, nomeadamente edifícios, com paredes em alvenaria antiga, perante o cenário de ameaça sísmica em que o nosso território se enquadra. Neste contexto apresentam-se, e aplicam-se a uma amostra nacional de cinquenta e oito igrejas em diferentes zonas sísmicas, métodos simplificados de aplicação expedita. Ainda que os métodos simplificados devam ser usados com reservas, apresenta-se ainda uma análise crítica dos resultados da amostra que precede recomendações para a utilização destes métodos em Portugal.

1. INTRODUÇÃO

As alvenarias antigas são particularmente vulneráveis a acções dinâmicas, entre as quais a acção sísmica é a mais preocupante. Com efeito, sendo Portugal historicamente um país de forte risco sísmico [1,2], a necessidade de tomar medidas preventivas de reabilitação/reforço estrutural que minorem os danos, ou evitem a perda de imóveis de incalculável valor histórico e cultural do património monumental, é uma prioridade actual dos técnicos e um desafio científico. O estabelecimento de prioridades de intervenção, com a elaboração de mapas de

vulnerabilidade, representa a base de uma adequada política de prevenção e conservação do património arquitectónico e cultural. Isto requer uma avaliação prévia do comportamento esperado das construções.

Um dos objectivos do presente trabalho é estudar a correlação entre as características arquitectónico-estruturais das construções e a zona sísmica em que se inserem, que permita associar ao risco de ocorrência de abalos sísmicos a previsão do grau de segurança, se possível, com indicação dos modos e mecanismos de dano mais prováveis. É neste contexto que a utilização de métodos simplificados expeditos se pode revelar muito útil.

2. MÉTODOS SIMPLIFICADOS DE ANÁLISE

Nas construções antigas de alvenaria, mesmo admitindo um adequado estado de conservação dos materiais é extraordinariamente complexo fazer uma análise estrutural rigorosa. As dificuldades resultam da heterogeneidade dos materiais que constituem as paredes e do desconhecimento do grau de ligação, quer entre paredes, quer entre paredes e pavimentos / coberturas, geralmente em madeira. Se existem reservas na avaliação da segurança das construções históricas para a acção das cargas verticais, quando se trata da acção sísmica as reservas são ainda maiores. Quanto maior for o rigor pretendido, maiores serão as dificuldades encontradas para a sua modelação e análise estrutural.

A aplicação dos métodos simplificados exige normalmente que a estrutura seja regular e simétrica, que os pavimentos de piso constituam diafragmas rígidos e que o modo de colapso condicionante ocorra por corte no plano das paredes [3]. Na maior parte das estruturas antigas estas duas últimas condições não se verificam, pelo que a avaliação da segurança com recurso a métodos simplificados resulta apenas numa indicação geral da aptidão do edifício para resistir aos sismos. Nesta comunicação apresentam-se três métodos simplificados para esse efeito:

Método 1: Percentagem da área em planta;

Método 2: Razão entre a área efectiva e o peso;

Método 3: Método do “corte basal”.

A aplicação destes métodos traduz-se na manipulação das características geométricas das paredes estruturais num indicador escalar. A representatividade do valor é tanto maior quanto maior for regularidade da estrutura. Estes métodos admitem o colapso por corte, no plano das paredes, descurando colapsos locais e colapsos por flexão das paredes (frequentes em construções históricas) [3]. Desta forma, é importante que a avaliação preliminar da segurança, com base em métodos expeditos, venha a incluir dados relativos à esbelteza das paredes.

A aplicação destes métodos pressupõe estruturas com paredes em alvenaria dispostas primordialmente em direcções ortogonais. Uma avaliação mais rigorosa, com resultados quantitativos fiáveis, é requerida para que possam definir-se de forma adequada as reais condições de segurança, a natureza e a extensão da eventual intervenção a realizar.

2.1. Percentagem da área em planta

O indicador mais simples, para avaliação da segurança sísmica das construções antigas, obtém-se pela percentagem da superfície de implantação ocupada pelas paredes resistentes (paredes de contraventamento) para cada direcção principal (longitudinal e transversal) da

construção. De acordo com o EC8 [4], para alvenarias de pedra, definem-se como paredes de contraventamento as paredes com espessura mínima de 0.40 m. O método estabelece o quociente entre a área de paredes e a área total, indicador $\gamma_{1,i}$ (percentagem da área em planta):

$$\gamma_{1,i} = A_{pi} / S = A_{pi} / A_p \cdot A_p / S \quad [\text{ad.}] \quad (1)$$

onde:

A_{pi} – área em planta das paredes resistentes na direcção “i”; A_p – área total em planta das paredes resistentes; S – área de implantação da construção.

Trata-se de um método simples que considera apenas relações de áreas em planta. O indicador $\gamma_{1,i}$, adimensional, dá uma ideia da dispersão da área da secção horizontal das paredes na área de implantação. Teoricamente, tal como a relação (A_{pi}/A_p) , de que depende, permite a comparação qualitativa da rigidez de corte basal entre estruturas. Contudo, ao ser independente da altura das construções não pondera a influência da esbelteza das paredes e a massa na avaliação da vulnerabilidade sísmica dos edifícios, pelo que deve ser utilizado com cuidado. De acordo com o EC8 [4], admitem-se valores mínimos de referência da ordem dos 5% para estruturas regulares e com lajes de piso (ou coberturas) que constituam diafragmas rígidos. No entanto, adoptando como referência, as percentagens empíricas a que, por tentativas, os construtores da antiguidade foram conduzidos no México (país com frequentes ocorrências de abalos sísmicos), nomeadamente nas catedrais de Oaxaca e da cidade do México, parece ser razoável adoptar valores mínimos da ordem dos 10% para construções antigas em zonas com aceleração sísmica elevada [3].

2.2. Razão entre a área efectiva e o peso

Um segundo indicador é a razão entre a área em planta das paredes estruturais, para cada uma das direcções principais, e o peso total da construção, dado por:

$$\gamma_{2,i} = A_{pi} / G = A_{pi} / A_p \cdot 1/(\gamma \cdot h) \quad [L^2 F^{-1}] \quad (2)$$

onde:

G – acção vertical quase-permanente; A_{pi} – área em planta das paredes resistentes na direcção “i”; A_p – área total das paredes resistentes em planta; γ – peso específico da alvenaria; h – altura (média) das construções.

Este indicador determina a secção horizontal das paredes disponível para mobilizar resistência ao corte, por unidade de peso das construções, dando uma ideia da capacidade resistente da estrutura em cada uma das direcções. Além das relações geométricas em planta, considera a influência da altura das construções. A experiência dos antigos construtores do México resultou em valores empíricos de referência de $\gamma_2 = 1.2 \text{ m}^2/\text{MN}$ para igrejas localizadas em zonas com aceleração sísmica elevada [3].

2.3. Método do corte basal

Finalmente, o método do corte basal estabelece um factor de segurança ao corte das paredes resistentes. O esforço de corte basal associado à acção sísmica ($V_{sd,base} = F_{sismica}$) é estimado com

uma análise estática ($F_{\text{sísmica}} = \beta \cdot G$). A capacidade resistente da estrutura ($V_{\text{rd,base}} = F_{\text{resistente}}$) é estimada admitindo condições para que todas as paredes resistentes possam mobilizar, em cada direcção da construção, toda a sua capacidade de resistência ao corte. A contribuição de cada parede determina-se a partir do produto da sua área transversal em planta (A_{pi}) pela tensão resistente ao corte da alvenaria (f_{vk}). A contribuição total, obtém-se do somatório de todas as contribuições, $F_{\text{resistente},i} = \sum A_{\text{pi}} \cdot f_{\text{vk}}$, onde, de acordo com o EC6, $f_{\text{vk}} = f_{\text{vko}} + 0.4 \cdot \sigma_d (f_{\text{vko}} - \text{coesão da alvenaria})$; σ_d - tensão normal de compressão na parede) [5]. Esta expressão (lei de atrito de Coulomb) pressupõe um ângulo de atrito interno para a alvenaria de 22°.

O indicador deste método representar-se-á por $\gamma_{3,i}$ e, para a direcção “i”, define-se pela relação:

$$\gamma_{3,i} = F_{\text{resistente},i} / F_{\text{sísmica}} \quad (3)$$

Admitindo coesão nula ($f_{\text{vko}} = 0$), $\gamma_{3,i}$ é independente da altura dos edifícios, sendo dado por:

$$\gamma_{3,i} = V_{\text{rd},i} / V_{\text{sd}} = A_{\text{pi}} / A_p \cdot \tan \varphi / (\alpha \cdot \beta_o) \quad (4)$$

A contribuição da coesão da alvenaria ($f_{\text{vko}} \neq 0$) para o coeficiente de segurança ao corte das paredes, é tanto mais significativa quanto menor for a altura das construções. Neste caso, o indicador $\gamma_{3,i}$ define-se pela seguinte expressão:

$$\gamma_{3,i} = V_{\text{rd},i} / V_{\text{sd}} = 1 / (\alpha \cdot \beta_o) \cdot A_{\text{pi}} / A_p \cdot [\tan \varphi + f_{\text{vko}} / (\gamma \cdot h)] \quad (5)$$

onde:

A_{pi} – área em planta das paredes resistentes na direcção “i”; A_p – área total, em planta, das paredes resistentes; h – altura média das paredes estruturais; γ – peso específico da alvenaria; φ – ângulo de atrito interno da alvenaria; β_o – coeficiente sísmico de referência; α – coeficiente de sismicidade geográfica.

Este indicador é o único que considera o efeito da sismicidade geográfica através do coeficiente sísmico β . Teoricamente serão mais resistentes as construções que apresentam maior relação (área de paredes/peso), ou seja, maior relação (A_{pi}/A_p) e menor altura. Com base na regulamentação europeia, onde o sismo é considerado uma acção accidental, e no tipo de construções em causa, parece razoável admitir que o indicador $\gamma_{3,i}$ deve tomar valores superiores à unidade.

2.4. Análise comparativa dos métodos

Faz-se aqui uma breve comparação entre os métodos simplificados. Começa-se por apresentar, para cada um dos métodos, as expressões que determinam os respectivos indicadores:

$$\begin{aligned} \text{Método 1: } \gamma_{1,i} &= A_{\text{pi}} / S = A_{\text{pi}} / A_p \cdot A_p / S = A_{\text{pi}} / A_p \cdot k_1 \text{ com } k_1 = A_p / S & [L^2/L^2] \\ \text{Método 2: } \gamma_{2,i} &= A_{\text{pi}} / G = A_{\text{pi}} / A_p \cdot 1 / (\gamma \cdot h) = A_{\text{pi}} / A_p \cdot k_2 \text{ com } k_2 = 1 / (\gamma \cdot h) & [L^2/F] \\ \text{Método 3: } \gamma_{3,i} &= V_{\text{rd}} / V_{\text{sd}} = A_{\text{pi}} / A_p \cdot \tan \varphi / (\alpha \cdot \beta_o) = A_{\text{pi}} / A_p \cdot k_3 & [F/F] \\ & \text{com } k_3 = \tan \varphi / \beta, f_{\text{vko}} = 0 \text{ e } \tan \varphi = 0.4 \\ \gamma_{3,i} &= 1 / (\alpha \cdot \beta_o) \cdot A_{\text{pi}} / A_p \cdot [\tan \varphi + f_{\text{vko}} / (\gamma \cdot h)] = A_{\text{pi}} / A_p \cdot k_3 & [F/F] \\ & \text{com } k_3 = 1 / \beta [\tan \varphi + f_{\text{vko}} / (\gamma \cdot h)], f_{\text{vko}} = 0.10 \text{ MPa e } \tan \varphi = 0.4 \end{aligned} \quad (6)$$

Uma análise comparativa preliminar permite concluir que:

1. Os métodos simplificados traduzem, através de indicadores, as características arquitectónico-estruturais dos edifícios em escalares. Desta forma, quanto mais irregulares e assimétricas forem aquelas características, menos significativo é o valor.
2. Os métodos fornecem indicadores proporcionais à relação entre a área em planta das paredes, na direcção “i”, e área total de paredes em planta: (A_{pi}/A_p) . Esta relação dá uma ideia da distribuição, em planta, da rigidez da estrutura em cada uma das suas direcções principais. A soma das relações (A_{pi}/A_p) , referentes a direcções ortogonais, pode ser superior à unidade devido às sobreposições.
3. Os métodos 1 e 2 são independentes da zona sísmica pelo que, admitindo construções com idênticas condições de segurança, os respectivos indicadores devem tomar valor crescente com o aumento da sismicidade geográfica. No mesmo pressuposto, o indicador γ_3 , ao depender da zona sísmica, deve ser constante.
4. O indicador γ_3 é o único que considera o efeito da sismicidade geográfica através do coeficiente de sísmico β .
5. O indicador γ_2 é dimensional (as unidades utilizadas podem variar de país para país), o que representa uma desvantagem importante relativamente aos outros indicadores.
6. Os indicadores desprezam, de um ponto de vista conceptual, o facto das paredes resistentes poderem apresentar maior susceptibilidade a outros tipos de rotura que não o de corte.

3. ESTUDO SOBRE IGREJAS PORTUGUESAS

O estudo realizado consiste na aplicação dos métodos simplificados a um conjunto de igrejas nacionais. Os principais objectivos do estudo prendem-se com a necessidade de:

1. Avaliar se existe uma relação empírica que possibilite uma avaliação expedita da segurança sísmica das construções com paredes em alvenaria antiga;
2. Avaliar se existe alguma relação empírica entre as características arquitecto-estruturais das construções antigas e a sismicidade geográfica;
3. Definir as prioridades de intervenção na amostra seleccionada;
4. Estimar, por extrapolação dos resultados da amostra, o estado relativo à segurança sísmica das construções históricas nacionais em alvenaria.

O estudo incidiu sobre igrejas por serem testemunhos bem documentados do património monumental em alvenaria. Além disso, um dado importante das igrejas, é terem sofrido e, nalguns casos, superado sismos ao longo da sua história, como se tivessem sido submetidas a autênticos ensaios sísmicos à escala real. Esta informação pode ajudar a perceber se as suas estruturas foram, ou não, ao longo da sua história, adaptadas à sismicidade geográfica.

A amostra de estudo é constituída por cinquenta e oito igrejas nacionais localizadas em diferentes zonas sísmicas (de acordo com o zonamento do país estabelecido no RSA [6]). A selecção das igrejas da amostra foi condicionada pela disponibilidade de peças desenhadas existentes no arquivo da Direcção Geral de Edifícios e Monumentos Nacionais (DGEMN), onde foi recolhida a quase totalidade da informação, tendo-se, contudo, procurado aumentar a dimensão da amostra na zona de maior risco sísmico. Assim, a amostra é constituída por vinte e cinco igrejas na zona sísmica A, onze na zona sísmica B, onze na zona sísmica C e onze na sísmica zona D.

Tabela 1 : Resultados para a amostra (■ - estudo adicional; ■ - violação de condição).

Zona	Designação	Localização	Método 1		Método 2		Método 3	
			γ_{1x}	γ_{1y}	γ_{2x}	γ_{2y}	γ_{3x}	γ_{3y}
A1	Igreja de Santa Cruz - Almodôvar	Beja	0,14	0,18	3,87	5,07	1,00	1,31
A2	Igreja de Santo Amaro/Capela de Santo Amaro	Beja	0,11	0,17	3,49	5,34	0,93	1,42
A3	Igreja da Misericórdia de Beja	Beja	0,10	0,11	4,02	4,18	1,15	1,20
A4	Igreja da Misericórdia das Entradas	Castro Verde	0,16	0,31	3,32	6,48	0,74	1,44
A5	Igreja Matriz de Mértola	Mértola	0,12	0,14	3,30	3,96	1,0	1,17
A6	Igreja Matriz de Entradas	Castro Verde	0,11	0,24	2,15	4,78	0,76	1,68
A7	Igreja Matriz de Vila do Bispo	V. Bispo	0,15	0,15	4,62	4,69	0,96	0,97
A8	Igreja da Luz – Capela Mor	Lagos	0,12	0,14	3,99	4,83	0,95	1,15
A9	Igreja Matriz de Loulé / Igreja São Clemente	Loulé	0,17	0,15	3,59	3,16	1,32	1,16
A10	Sé de Silves	Silves	0,12	0,18	2,02	3,00	0,94	1,40
A11	Igreja Matriz/ Igreja de São João Baptista	Alcochete	0,13	0,16	3,97	4,97	0,94	1,17
A12	Igreja do antigo Mosteiro de Jesus - São Julião	Setúbal	0,11	0,24	1,43	3,02	0,67	1,42
A13	Igreja Matriz S. Salvador	Sines	0,12	0,15	2,78	3,68	0,92	1,22
A14	Igreja de S. Lourenço	V.N. de Azeitão	0,09	0,17	2,85	5,59	0,79	1,55
A15	Igreja de Nossa Senhora da Graça	Barreiro	0,10	0,14	3,98	5,43	0,92	1,26
A16	Igreja de São Quintino	Sobral. Mte Agraço	0,11	0,16	2,65	3,98	0,86	1,29
A17	Igreja da Cheleiros	Mafra	0,16	0,14	4,26	3,90	0,95	0,87
A18	Igreja de Santa Maria	Sintra	0,12	0,19	3,06	4,74	1,0	1,52
A19	Igreja de Santo André	Mafra	0,13	0,19	3,67	5,38	1,0	1,46
A20	Igreja Matriz da Lourinhã	Lourinhã	0,11	0,19	3,11	5,48	0,89	1,57
A21	Igreja Matriz de Loures	Loures	0,09	0,20	1,45	3,38	0,63	1,47
A22	Igreja Paroquial de S. Cristóvão	Lisboa	0,14	0,17	3,30	4,00	1,27	1,54
A23	Igreja de São Domingos	Lisboa	0,19	0,22	3,84	4,35	1,61	1,83
A24	Igreja da Terrugem	Sintra	0,13	0,17	4,73	6,03	1,04	1,32
A25	Igreja Matriz de Arruda dos Vinhos	A. dos Vinhos	0,12	0,14	3,52	4,05	1,14	1,31
B1	Igreja de Santa Clara	Santarém	0,07	0,12	1,53	2,72	1,08	1,92
B2	Igreja Matriz da Golegã	Golegã	0,08	0,13	2,34	3,66	1,34	2,10
B3	Igreja Matriz de Arronches	Portalegre	0,09	0,14	2,23	3,37	1,22	1,84
B4	Igreja Matriz da Redinha	Pombal	0,11	0,17	3,18	5,01	1,07	1,68
B5	Igreja Matriz de S. João Baptista	Moura	0,09	0,13	1,86	2,86	1,29	1,99
B6	Igreja de S. Pedro	Leiria	0,06	0,20	1,68	5,26	0,70	2,19
B7	Igreja Matriz da Batalha	Batalha	0,11	0,15	2,96	4,01	1,28	1,74
B8	Igreja de Sta. Maria dos Olivais	Tomar	0,07	0,10	2,75	4,01	1,17	1,71
B9	Igreja da Atalaia	Santarém	0,18	0,21	5,32	6,37	1,88	2,25
B10	Igreja de Santa Cruz	Santarém	0,12	0,14	2,52	2,83	1,30	1,46
B11	Sé de Évora	Évora	0,09	0,15	1,17	1,94	1,09	1,82
C1	Igreja de S. Tiago de Coimbra	Coimbra	0,09	0,19	1,72	3,60	1,17	2,45
C2	Igreja Matriz de Vouzela	Vouzela	0,11	0,21	2,51	4,68	1,43	2,66
C3	Igreja de Nossa Senhora da Fresta	Trancoso	0,11	0,22	2,64	5,55	1,29	2,70
C4	Igreja de São Pedro de Arganil	Arganil	0,08	0,14	4,50	7,69	1,55	2,64
C5	Sé velha	Coimbra	0,15	0,20	1,64	2,07	1,99	2,52
C6	Igreja Matriz da Lourosa	Oliveira do Hospital	0,09	0,15	4,17	7,11	1,54	2,63
C7	Igreja da Tocha	Cantanhede	0,10	0,18	1,62	2,87	1,32	2,35
C8	Igreja Paroquial de Figueiró dos Vinhos	Leiria	0,10	0,11	2,92	3,09	1,99	2,10
C9	Igreja e Convento de S. João Tarouca	Viseu	0,07	0,15	3,40	7,10	1,31	2,75
C10	Igreja da Misericórdia do Sabugal	Guarda	0,10	0,15	3,17	4,81	1,63	2,46
C11	Igreja de S. Miguel de Urró - Arouca	Aveiro	0,10	0,22	2,83	6,03	1,37	2,92
D1	Igreja da Misericórdia	Freixo Espada a Cinta	0,15	0,11	2,52	1,89	3,63	2,72
D2	Igreja de Algosinho	Mogadouro	0,14	0,21	4,52	6,45	3,02	4,31
D3	Igreja do Tabuado	Marco Canaveses	0,15	0,17	2,72	3,07	2,55	2,87
D4	Igreja Matriz de Armamar	Armamar	0,13	0,18	2,96	4,18	3,00	4,23
D5	Igreja de N. Sra da Orada	Melgaço	0,12	0,23	2,29	4,53	1,95	3,86
D6	Igreja de S. Miguel do Castelo	Guimarães	0,11	0,24	3,02	6,58	2,20	4,79
D7	Igreja de Almacave	Lamego	0,15	0,18	2,86	3,44	3,13	3,75
D8	Igreja de S. Martinho de Cedofeita	Porto	0,24	0,28	2,77	3,24	3,69	4,32
D9	Igreja de Santo Cristo de Outeiro	Vimioso	0,15	0,17	2,03	2,25	3,64	4,04
D10	Igreja de N. Sra da Azinheira	Chaves	0,10	0,25	2,83	7,25	1,91	4,91
D11	Igreja de S. Fins de Friestas	Viana do Castelo	0,11	0,24	3,07	6,90	2,84	6,38

Na Tabela 1 apresentam-se as igrejas incluídas na amostra por zona sísmica, bem como os resultados da aplicação dos métodos simplificados, ver [7] para mais detalhes.

3.1. Análise global dos resultados

Na aplicação dos métodos simplificados admitiu-se que os materiais que constituem a alvenaria das paredes, e as próprias características mecânicas das alvenarias são idênticas em todas as igrejas. Admitiu-se ainda, para estimativa do peso das construções, um peso específico médio das alvenarias de 20 kN/m^3 e um peso para coberturas igual a 2.0 kN/m^2 .

O indicador γ_1 parece revelar uma situação inadequada das igrejas do nosso país, ao apresentar valores médios com pequenas variações entre zonas de diferente sismicidade (Figura 1). Com efeito, sendo este indicador independente da sismicidade geográfica, seria expectável um decréscimo do indicador ($\gamma_{1,A} > \gamma_{1,B} > \gamma_{1,C} > \gamma_{1,D}$) com a diminuição do risco sísmico geográfico, o que não parece acontecer com base nos resultados da amostra. Contudo, de acordo com os valores empíricos [3], os resultados não indiciam preocupações de segurança.

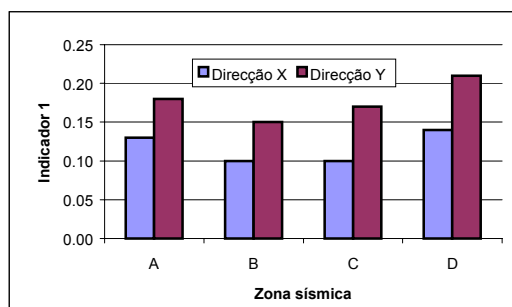


Figura 1: Resultados médios do indicador γ_1 , para a amostra de estudo, em função da zona sísmica e da direcção analisada.

Estes resultados indiciam que as relações de área (A_{pi}/A_p), em planta, das construções históricas são independentes da zona sísmica geográfica. A confirmação destes resultados pode significar que a memória dos grandes danos sísmicos, registados predominantemente nas zonas de maior sismicidade, não se reflectiu em medidas preventivas, construtivas ou de reforço, face a futuros abalos. A hipótese de “memória curta” dos efeitos sísmicos parece razoável em Portugal Continental, uma vez que o período de retorno dos grandes sismos é muito longo.

O indicador γ_2 , razão entre a área efectiva das paredes e o peso, apesar de ser inversamente proporcional à altura das construções, revela uma situação idêntica à evidenciada pelo indicador do método 1. Com efeito, ao não depender da zona sísmica os seus valores deviam aumentar com a sismicidade geográfica. Os resultados do indicador γ_2 não indiciam a tendência esperada (Figura 2a), salientando-se a independência da altura média das igrejas da amostra em relação à zona sísmica (Figura 2b). De acordo com estes resultados, a influência da altura no indicador γ_2 não compensa o efeito ausente do coeficiente de sismicidade, pelo que, em termos médios, a altura das igrejas, em Portugal, não é função zona sísmica. Contudo, tomando como referência os valores dos antigos construtores do México [3], os resultados não indiciam preocupações de segurança das construções.

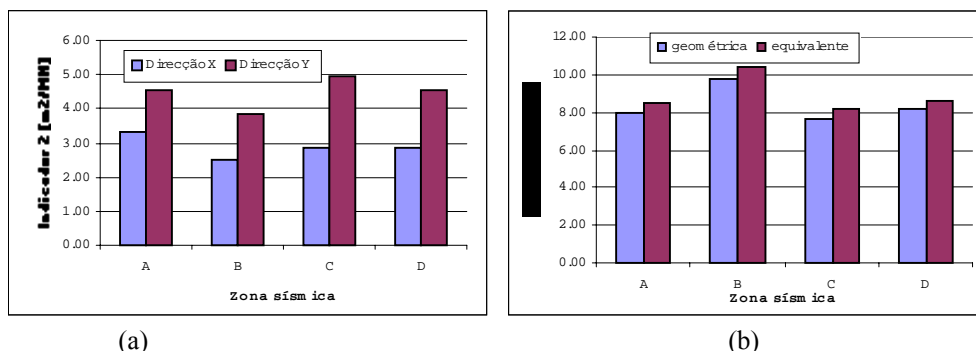


Figura 2: Resultados médios para a amostra, por zona sísmica: (a) indicador γ_2 em função da direcção analisada; (b) altura média das igrejas ($h_{equiv} = \text{Peso}/A_p \cdot \gamma$).

O indicador γ_3 , face à constância observada nos outros indicadores apresenta, obviamente, valores crescentes com a diminuição da sismicidade (Figura 3). Em termos médios, os valores do indicador γ_3 são aceitáveis apesar de, na zona sísmica A e para a direcção mais vulnerável, estarem ligeiramente abaixo do limite mínimo.

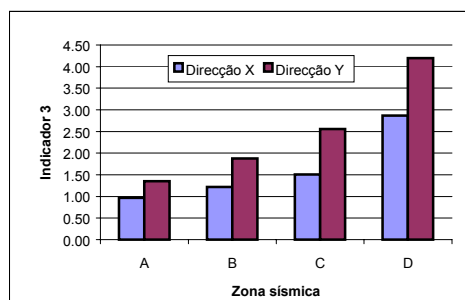


Figura 3: Resultados médios do indicador γ_3 na amostra de estudo, em função da zona sísmica e da direcção analisada.

3.2. Comparação dos resultados por zona

Na zona A, os indicadores são contraditórios. Com efeito enquanto os indicadores do método 1 parecem adequados, em ambas as direcções, os resultados do método 3, em média, indiciam que as paredes na direcção x são insuficientes, chegando mesmo a atingir valores 40% inferiores ao mínimo aceitável. Assim a segurança, na direcção transversal, de algumas destas estruturas deve ser considerada com reservas. Nas zonas B, C e D, em média, todos os indicadores são aceitáveis.

3.3. Recomendações

O método 1, sendo um método simples que considera relações de área em planta deve apenas utilizar-se para comparações qualitativas entre estruturas, dentro da mesma zona sísmica e com

idênticas características arquitectónico-estruturais, nomeadamente em termos de altura da construção. O método 2 e o método 3, sendo mais completos, exigem uma reflexão adicional.

Em termos práticos, comparar os indicadores γ_2 e γ_3 é equivalente a comparar $(1/h)$ com $(1/\beta)$, o que, face aos resultados, não parece ser uma tarefa fácil. Com efeito, se tomarmos como exemplo uma construção a que, na zona sísmica A, corresponda um coeficiente de segurança ao corte unitário ($\gamma_3=1$), esta terá coeficientes de segurança tanto maiores quanto menor for a sismicidade da zona onde se venha a enquadrar. No entanto, o indicador de segurança é constante ($h = \text{constante}$) se for aplicado o método 2. Desta forma e com o objectivo de estabelecer valores mínimos de referência para o indicador γ_2 , em função da sismicidade geográfica, propõe-se aferir esses valores pelo mínimo do indicador γ_3 . Assim, como

$$\gamma_{3,i \min} = 1.0 \rightarrow \gamma_{3,i \min} = (A_{pi}/A_p)_{\min} \cdot \text{tg}\phi/\beta \rightarrow (A_{pi}/A_p)_{\min} = \beta/\text{tg}\phi \quad (7)$$

$$\gamma_{2,i} = A_{pi}/A_p \cdot 1/(\gamma \cdot h) \rightarrow \gamma_{2,i \min} = (A_{pi}/A_p)_{\min} \cdot 1/(\gamma \cdot h) \rightarrow \gamma_{2,i \min} = \beta/(\gamma \cdot h \cdot \text{tg}\phi) \quad (8)$$

Com base nas hipóteses assumidas para as características das alvenarias da amostra ($\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$ e $\text{tg}\phi = 0.4$) e nos valores regulamentares da aceleração sísmica, traduzidos pelo coeficiente de sísmico β ($\beta = 0.22 \alpha$), os valores mínimos de $\gamma_{2,i}$ podem obter-se através da expressão:

$$\gamma_{2,i \min} = 27.5 \alpha / h [\text{m}^2/\text{MN}] \quad (9)$$

Da análise desta expressão constata-se que, contrariamente ao indicador γ_3 , o indicador γ_2 pode ser aceitável com valores inferiores à unidade. Em termos médios, para a amostra de estudo, os valores de referência ($\gamma_{2,i \min}$) estão representados, por zona sísmica, na Figura 4.

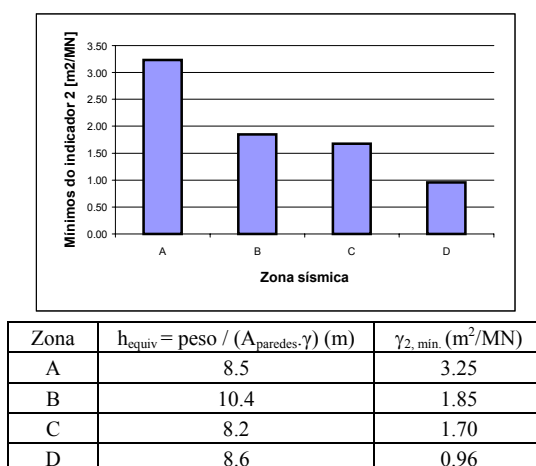


Figura 4: Valores de referência do indicador γ_2 para a amostra de estudo, em função da altura média das igrejas por zona sísmica.

Nos termos expostos, conhecido o indicador γ_2 e o correspondente mínimo de referência $\gamma_{2, \min}$, a determinação da segurança ao corte basal das paredes (indicador γ_3) é imediata. Com efeito,

$\gamma_3 = \gamma_2 / \gamma_{2, \min.}$. Além disso, nessas condições, o método 2 pode ser aplicado universalmente desde que conhecidas as acelerações sísmicas locais que determinam os valores de referência. Os valores de referência [3] para o indicador 2 não se adequam às construções antigas em Portugal Continental. Com efeito, as características das igrejas do México, nomeadamente a altura, onde foram aferidas aquelas referências, são muito diferentes das do nosso país.

Para a utilização do indicador γ_2 recomendam-se, como referência, os valores propostos para o indicador $\gamma_{2, \min.}$. A aplicação deste indicador ($\gamma_{2, \min.}$) às igrejas do México conduz, sensivelmente, às referências empíricas dos seus construtores. Para o indicador γ_3 , recomendam-se valores superiores à unidade ($\gamma_3 > 1.0$). Como critério de avaliação da segurança sísmica propõe-se a combinação do indicador γ_3 , independente da altura das construções, com o indicador γ_2 , inversamente proporcional à altura das construções. Desta forma, recomenda-se que, como avaliação preliminar de vulnerabilidade sísmicas, sejam consideradas em condição não prioritária as construções (igrejas, neste caso) que verifiquem simultaneamente as seguintes condições: $\{\gamma_2 > \gamma_{2, \min. \text{ zona}} \text{ e } \gamma_3 > 1.0\}$. Nota-se que a aplicação da primeira condição é diferente de impor uma exigência à altura das construções, porque o indicador γ_2 considera a influência das paredes em planta das e $\gamma_{2, \min}$ considera a altura e a sismicidade geográfica.

4. CONCLUSÕES

1. Os resultados dos métodos simplificados revelam que, em Portugal Continental, as características geométrico-estruturais das construções históricas, em alvenaria, são independentes da zona sísmica, o que pode ser interpretado com o desconhecimento da sismicidade local por parte dos construtores antigos.
2. De uma forma geral, independentemente da zona sísmica e do método utilizado, a direcção longitudinal (y) apresenta menor vulnerabilidade que a direcção transversal (x).
3. As construções localizadas em zonas de maior sismicidade, independentemente do seu grau de segurança, estão mais vulneráveis que as localizadas em zonas de menor risco sísmico.
4. Recomenda-se a adopção de um critério de risco para as construções que violem as recomendações: $\{\gamma_2 > \gamma_{2, \min. \text{ zona}} \text{ e } \gamma_3 > 1.0\}$. Nesta situação foram encontradas nove igrejas nas zonas sísmicas A e B, que merecem um estudo mais aprofundado.

5. REFERÊNCIAS

- [1] Moreira, V. J., “Contribuição para o Conhecimento da Sismicidade Histórica de Portugal Continental”. Separata da Revista do INMG, Vol. 2, nº 3 e 4, Lisboa, 1979.
- [2] Moreira, V. J., “Sismicidade Histórica de Portugal Continental”, Separata da revista do INMG, Lisboa, 1984.
- [3] Meli, R., “Ingeniería Estructural de los Edificios Históricos”. Fundación ICA, México, 1998.
- [4] CEN, “Eurocódigo 8 - Disposições para projecto de estruturas sísmo-resistentes”, 1998.
- [5] CEN, “Eurocódigo 6 - Projecto de estruturas de alvenaria”, 1996.
- [6] Regulamento de Segurança e Acções em Estruturas de Edifícios e Pontes, Porto Editora.
- [7] Roque, J. A., “Reabilitação Estrutural de Paredes Antigas de Alvenaria”. Tese de mestrado, Universidade do Minho, 2002. Disponível em www.civil.uminho.pt/masonry.